

强流带电粒子束 物理学导论

[美] R. B. 米勒



原子能出版社

内 容 简 介

本书是强流带电粒子束(包括电子束和离子束)物理学的一本基础入门书。它以清晰的物理概念和简洁的数学推演,阐明了强流束物理的许多重要问题。全书共八章,第1—5章叙述了强流粒子束产生和传输的物理规律,第6—8章阐述了强流束当前几种重要的应用专题。本书题材广博、内容翔实。对于科学院,工业研究部门,高等院校从事高功率脉冲技术、加速器、等离子体物理、空间物理、相对论电子学、强流束物理等专业的理论、工程和应用研究人员,这是一本很有实用价值的专业参考书。本书也可作为高等院校教师、高年级大学生、研究生的专业课教材。

强流带电粒子束

物理学导论

[美] R.B.米勒 著

刘锡三 张兰芝 吴衍斌

鲁敬平 周丕璋 译

黄世明 彭翰生 校

冯 杰 沈华忠

责任编辑:唐信青

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092¹/₃₂·印张13·字数292千字插一

1990年 北京第一版·1990年3月北京第一次印刷

印数1—940

ISBN7-5022-0201-3

O·24 定价:12.85元

译 者 的 话

自1964年第一台强流相对论性电子束加速器（亦称强流脉冲电子束加速器）问世以来，强流束的理论与技术发展非常迅速。目前，强流束已在国防科研、高技术研究等方面得到了广泛应用，成为当前国际上比较活跃的一门前沿科学技术。

我国对高功率脉冲技术和强流束物理的研究是在老一辈科学家尤其是王淦昌教授的关心与倡导下开展起来的。早在60年代初，他就倡导并开展了脉冲X射线技术的研究，70年代在他的指导下，又建成了大型强流脉冲电子束加速器，使我国在强流束的理论研究与应用方面取得了一定成效。趁本书出版之际，我们谨以这本译作来祝贺王淦昌教授的80寿辰、来迎接“全国第三届高功率粒子束学术交流会”的召开。我们希望本书能起到推动我国强流束技术进一步发展的作用。

全书共分八章。其中，张兰芝译第一章和第八章，周丕璋译第二章，鲁敬平译第三章，刘锡三译第四章和第五章，吴衍斌译第六章和第七章。以上各章，由彭翰生、冯杰、沈华忠、黄世明校对，最后由刘锡三、黄世明统一整理与细节订正。

本书的翻译出版是由王淦昌教授倡导的。中国粒子加速器学会高功率粒子束专业组积极推动了这一工作，核工业部科技司及原子能出版社的有关领导也给予了大力支持。我们

在此一并致谢。强流带电粒子束物理学是一门新学科，许多新词汇不断涌现，翻译中我们力求做到确切贴体。但因时间仓促，水平有限，书中难免有错误或不足之处，欢迎读者批评指正。

译者 1988年3月

序

R. B. 米勒教授所著“强流带电粒子束物理学导论”一书，以清晰的物理概念和简洁的数学推导，阐述了强流粒子束（包括电子束和离子束）的产生、传输和应用的许多基本物理问题。

六十年代初期，英国原子武器研究中心的 J. C. 马丁首先建议运用脉冲功率技术产生强流相对论性电子束。他成功地将传输线技术运用于脉冲功率研究，从而开创了脉冲功率研究的新局面，建造了世界上第一台强流相对论性电子束加速器 SMOG (3 MV, 50kA, 30ns)。在过去的廿多年内，强流相对论性电子束加速器用做核武器效应模拟源和闪光 X 射线机，得到了迅速地发展，七十年代后期，由于粒子束惯性约束聚变方案的提出，强流粒子束加速器向着更高的功率水平发展。近几年来，利用强流粒子束加速器来获得强脉冲离子束已取得了重大技术进展，目前强流粒子束加速器已达到 100TW 的功率水平。

虽然早在五十年代，就有人曾提出利用强流相对论性电子束的设想，直到由于马丁的创举，才使得这种强流相对论性粒子束的实际应用真正成为可能。

这是第一本比较系统和全面讲述强流束物理的教科书，书中介绍脉冲功率技术的第 1 至 2 章，引用和概括了马丁的许多极为重要的第一手专题研究资料，比如 Marx 发生器、快脉冲形成线、介质击穿特性、开关、真空闪络等有关技

术，马丁的这些基础研究工作，奠定了这类高功率脉冲加速器的理论和技术基础。书中第3至5章阐述了强流束在真空、等离子体和气体中传输的物理现象。第6至8章概述了几个典型的应用专题。

今天，强流粒子束的应用已深入到许多科学研究领域：如核爆模拟器、高能闪光X射线照相、惯性约束聚变、集体离子加速、相干微波辐射源、高功率激光器、强脉冲中子源和堆材料研究、核电磁脉冲和内电磁脉冲、等离子体的加热和约束等许多方面，这是当前国际上比较活跃的一门前沿科学技术，它有着广阔的发展前景。很值得注意的一点是强流粒子束一旦与某个领域相结合，就会取得别开生面的成就，获得重大的技术突破，成为重要的研究工具。

随着应用向着广度与深度发展，对于强流束物理（特别是二极管物理和束传输物理）的研究越来越引起人们的重视。强流束物理是一门新兴的年青学科，它又是一门边缘学科，与加速器物理，等离子体物理，激光物理，高电压技术，微波技术等相互交叉与渗透。强流粒子束所内蕴的现象是十分丰富的，许多规律有待于我们去进一步探索与揭示。

近年来，由于强流粒子束在自由电子激光和其它军事研究方面的应用，对于束流品质和工作重复频率都提出了难度较大的要求，这些实际需求必将推动强流粒子束加速器技术本身向着更高的水平发展。

我国强流粒子束的研究，从六十年代初期研制脉冲X射线机开始，逐渐发展壮大起来的。七十年代建造了大型强流电子束加速器，八十年代又相继开展了集体加速、粒子束惯性约束聚变、准分子激光、自由电子激光、束传输等项研究工作。我国先后建造了大约廿余台强流电子束加速器，为开

展强流束物理研究创造了良好的条件。利用现有装置，充分开展物理实验工作，可以不断完善和加深我们对强流粒子束的认识。

我高兴地向全国从事高功率脉冲技术，加速器技术和强流束物理研究的同志们推荐这本书。这虽是一本专业性较强的书，但写得深入浅出，给读者清新实用之感。多年来，我们都感到苦于缺少一本理论可靠、分析透彻、内容翔实的专著，R. B. 米勒的书应时而出。本书不仅对于从事工程技术和实验工作的人员可以从中得到很大的收益，开拓我们的物理思路，而且对于从事理论研究工作的人员，也会从中受到不少启迪。

原子能出版社的同志，及时出版此书，一定会起到推动我国强流粒子束物理进一步发展的作用。

王淦昌

1988.9.3

前 言

强流带电粒子束可以看成是一束自成体系的带电粒子流，在描述其演变过程时，束的自身场效应是极为重要的。目前研究应用这种束的领域正在迅速扩大，其中包含从高功率相干辐射源的研制到惯性约束聚变等主要领域。美国、英国以及苏联、日本和其它一些东欧、西欧国家的许多实验室现在都已制定了专门研究规划。此外，美国和其他国家几所大学的研究生班正在从事有关的研究活动。

作者于1973年开始涉足这个领域时，还没有任何一部既广泛论述到各种重要专题，而其内容详尽又足以使研究人员感兴趣的专著。本书便是在这种背景下试图填补这个空白。因此，本书是专为研究生和刚开始做研究工作的人员而写的，不过它的广博内容，对于高级工作人员也是极适宜的参考资料。

带电粒子束传输所包含的大部分现象，可在宏观流体模型的范围内，根据符拉索夫和麦克斯韦方程的有关基本参量来理解，本书始终据此描述有关现象。不过，在某些要取决于详细的动量空间结构的重要情况中，也采用了基于符拉索夫方程的等离子体动力学方法。除加说明的几个特例之外，本书采用的是高斯制单位。

本书分为两个主要部分。在基础的第一至第五章中，将强流束的产生和传输方面的大量精髓材料归纳于一种逻辑形式，并用前后贯通的方式加以介绍。著述中，作者力求在物理概念的论述和数学推演之间保持均衡。一般说来，这部分

内容不难透彻理解。在进行分析处理之前，对每种重要情况的基本物理意义和概念都先作详细叙述。

与此相比，第六至第八章中所包含的专题内容，一般是不太好理解的，对此要作更多叙述性的处理，说明这些领域尚处在迅速发展的阶段。在有些情况下，一些重要的物理机制还有很多争议，系统地阐述这些内容使其完整而又妥贴是困难的。专题的选择出自作者的兴趣以及实际时间的限制。可望今后将会有关于上述专题以及其它几个涉及强流现象专题方面的专著陆续出版。

每章末尾列出的习题是按该章讲述内容的次序而不是按深浅的程度排列的，有些习题是比较通俗的，其所以列选是因为它们可以实例说明重要的物理概念。相反，有个别习题难度很大，要作繁琐的数学运算。

编写本书得到一些同事的帮助。我要特别感谢 B. Godfrey, R. Adler, J. Poukey, T. Genoni, J. Freeman, C. Olson, K. Prestwich, S. Humphries, M. Widner, D. Straw, C. Clark, T. Martin, G. Kuswa, G. Yonas, A. Mondelli, P. Sprangle, W. Barletta, B. Newberger, S. Putnam, L. Sloan, K. Brueckner, 和 N. Rostoker 等人，他们对专门问题提出了许多意见并对部分手稿进行了审阅。我也感谢 D. Woodall（使我有机会用本书给新墨西哥大学研究生班讲授课程）和我的勤奋努力的学生们。最后，还要感谢 Karen Adler, Carla Barela, 和 Nancy Lee 帮助打印手稿，感谢 Cindy Miller 和 Margaret Clark 帮助制图并最后订正细节。

新墨西哥，阿尔布奎克 R. B. 米勒

目 录

第一章 引论	1
1.1 背景	1
1.2 脉冲功率技术	3
1.2.1 马克斯发生器	5
1.2.2 脉冲形成线	7
1.2.3 开关	14
1.2.4 真空二极管	19
1.3 带电粒子束的定性行为	21
1.3.1 真空螺线管磁场中的传输	24
1.3.2 本底等离子体引起的电荷和电流中和	26
1.4 宏观流体描述	27
第二章 强流电子束和离子束的产生	32
2.1 引言	32
2.2 电子发射过程	34
2.2.1 热阴极发射和光电发射	34
2.2.2 场致发射	35
2.2.3 爆炸电子发射	39
2.3 高功率二极管中的电子流	42
2.3.1 相对论性平面二极管	44
2.3.2 顺电势流	47
2.3.3 无箔二极管	52
2.4 高功率二极管中的离子流	57
2.4.1 空间电荷限制的双向流	58
2.4.2 反射三极管	60
2.4.3 磁绝缘离子二极管	67

2.4.4	箍缩电子束二极管中时间相关的电子流和离子流	71
2.5	提要	75
第三章	强流粒子束在真空中的传输	83
3.1	引言	83
3.2	层流平衡的一般方程	84
3.3	空间电荷限制电流	91
3.3.1	无限长漂移空间内的薄环形束	92
3.3.2	无限大一维漂移空间	94
3.3.3	长漂移空间内求解极限电流的迭代方法	96
3.3.4	任意几何形状漂移空间中空间电荷限制电流的上限	97
3.3.5	一维漂移空间内非相对论性束波的频谱	100
3.4	虚阴极的形成	106
3.4.1	经典的静态理论	106
3.4.2	不稳定流的预测	108
3.4.3	单电荷层模型	109
3.4.4	虚阴极的时间相关行为	112
3.5	非中和相对论性电子束的层流平衡	115
3.5.1	相对论性的刚性转子平衡	115
3.5.2	相对论性的空心束平衡	117
3.5.3	一般层流束平衡	117
3.6	电子中和的强流离子束的真空传输	126
3.6.1	共直线电子中和	127
3.6.2	横向电子注入	129
3.7	强流相对论性电子束的静电稳定性	131
3.7.1	刚性转子平衡的稳定性	134
3.7.2	空心束平衡的稳定性 (吉卡特朗不稳定性)	138

3.7.3	电子-电子双流不稳定性	142
3.8	提要	145
第四章	强流束在等离子体中的传输	153
4.1	引言	153
4.2	电流中和	154
4.3	宏观的束-等离子体平衡	164
4.3.1	$B_0 = 0$ 时的温流体平衡	165
4.3.2	放电通道中的温流体平衡	167
4.3.3	具有轴向磁场的冷流体平衡	168
4.4	宏观的束-等离子体不稳定性	170
4.4.1	电阻性蛇管不稳定性	171
4.4.2	腊肠不稳定性	181
4.5	微观不稳定性	186
4.5.1	电荷中和的电子束的稳定性 (邦内曼不稳定性)	187
4.5.2	稠密等离子体中电子束的稳定性 (双流和回旋不稳定性)	188
4.5.3	电磁丝裂[怀布尔(Weibel)]不稳定性	194
4.6	线性相对论性电子束用于等离子体加热	198
4.6.1	返回电流相互作用	200
4.6.2	束电子流-等离子体电子流相互作用	202
4.7	提要	205
第五章	强流束通过中性气体的传输	211
5.1	引言	211
5.2	束引起的中性气体电离过程	212
5.2.1	电子碰撞电离	212
5.2.2	电子雪崩	213

5.2.3	离子电离.....	214
5.3	$I_b/I_1 < 1$ 中性气体传输.....	214
5.3.1	低气压范围.....	214
5.3.2	中等气压范围.....	216
5.3.3	高能束在高气压范围的传输.....	217
5.4	$I_1 \lesssim I_b \lesssim I_A$ 中性气体传输.....	220
5.4.1	低气压范围.....	220
5.4.2	中等气压范围.....	223
5.4.3	高气压范围.....	227
5.5	$I_b > I_A$ 中性气体传输.....	228
5.6	提要.....	229
第六章 高功率相干辐射源.....		232
6.1	相对论性微波磁控管.....	233
6.1.1	起振现象.....	235
6.1.2	阳极电路.....	238
6.1.3	电子空间电荷与射频场的相互作用.....	248
6.2	电子回旋脉塞 (ECM).....	259
6.2.1	电子回旋脉塞的物理机制.....	261
6.2.2	ECM 机制的线性理论.....	263
6.2.3	ECM 不稳定性的非线性饱和机制.....	271
6.3	自由电子激光 (FEL).....	273
6.3.1	自由电子激光的物理机制.....	275
6.3.2	喇曼散射范围的自由电子激光的线性理论.....	283
6.3.3	自由电子激光的非线性饱和机制.....	289
6.4	提要.....	291
第七章 线性强流相对论性电子束的集体离子		
	加速.....	294
7.1	引言.....	294

7.2 中性气体和真空二极管系统实验结果简介	296
7.2.1 中性气体漂移管中的集体离子加速	296
7.2.2 真空漂移管中的集体离子加速	303
7.3 电离前沿加速器 (IFA)	305
7.4 波集体离子加速机制	309
7.4.1 自共振加速器 (ARA)	311
7.4.2 会聚波导加速器 (CGA)	316
7.5 提要	319
第八章 粒子束聚变概念	323
8.1 引言	323
8.2 靶丸内爆判据	325
8.2.1 带电粒子的能量沉积	329
8.2.2 靶丸压缩	335
8.2.3 瑞利-泰勒不稳定性	337
8.2.4 带电粒子束惯性约束聚变靶的设计	338
8.3 电子束聚变概念	347
8.3.1 真空二极管中的电子束聚变	347
8.3.2 多路电子束叠加方案	348
8.4 离子束聚变概念	352
8.4.1 轻离子聚变途径	353
8.4.2 重离子聚变途径	362
8.5 提要	364
参考文献	367
索引	395

第一章 引 论

1.1 背景

自60年代初以来，高压脉冲功率技术的迅速发展，使产生粒子动能在 $\sim 100\text{keV}$ 到 $\geq 10\text{MeV}$ 范围内的电子和离子强流脉冲（ $\geq 10\text{kA}$ ）方法能够研究成功。虽然这些技术最初是为材料试验、X射线照相和核武器效应模拟的应用发展起来的，但随即发现它们在热核聚变、微波产生、集团离子加速和激光激励等诸多领域内有着广泛的用途。

尽管如此众多研究领域的目标和课题可能完全不同，但是对于了解支配强流带电粒子束运动的物理原理却有着共同的要求。本书的中心目的是对具有实际意义的各种情况下强流束的传输给出基本的描述。作为引论的第一章，我们首先介绍脉冲功率技术的简单概况，这是其余专题的前提。在1.3节，我们用单粒子束包络方程对强流束行为作初步的描述，而涉及当作宏观流体来处理的基本方程则在1.4节导出。

第二至第五章构成本书的基本核心，第二章介绍在高压二极管中产生强流电子束和离子束的各种机制。2.2节描述重要的电子发射过程，而电子在高功率二极管中的流动则在2.3节中进行研究。正如2.4节讨论的那样，如果把高压二极管中的电子分布加以适当控制或调节的话，那么同样的高压二极管也能用于产生很强的离子束。

第三章讨论强流束在真空中的传输。对于电子束，特别着重于平衡和稳定性要求，以及虚阴极形成的现象。对于离子束，注意力则集中在由电子空间电荷引起电荷中和的机制上。层流平衡的一般方程将在3.2节中导出，而空间电荷限制电流和虚阴极形成的重要概念在3.3和3.4节进行详细论述。在3.5节描述了几种相对论性电子束的平衡状态，而强流离子束经电子中和后的传输则在3.6节中研究。在3.7节对各种稳定性课题进行仔细推究。

第四章论述强流束在电荷中和的等离子体本底中的传输。在4.2节描述了电流中和的重要现象，而4.3节论述宏观的束-等离子体平衡。宏观的与微观的束-等离子体的几种不稳定性在4.4和4.5节研究。最后，4.6节中较为详细地论述了线性相对论性电子束用于等离子体加热的问题。

第五章以讨论束通过中性气体本底的传输来结束束传输过程的基础研究。在5.2节概述了重要的电离过程，而在5.3至5.5节则根据不同的束流和本底气压范围来说明中性气体传输的特点。

本书的其余几章包括所选专题的分析。第六章讨论相干辐射的高功率源，其中包括相对论性磁控管（6.1节），电子回旋脉塞（6.2节）和自由电子激光器（6.3节）。第七章概述了离子集团加速方法，包括历史述评（7.1节），然后是非中和电子束前沿产生的势阱的控制技术（7.2节）和大幅度束波的增长和控制方法（7.3节）。最后一章专门评述了用强流粒子束实现惯性约束聚变的几种途径。8.1节扼要叙述了靶丸内爆的条件，8.2至8.4节论述了满足这些条件的可能方法。

1.2 脉冲功率技术

高压脉冲功率装置的研制是60年代初期由英国原子武器研究中心的马丁(J. C. Martin)首先开始的。这项研究的基本特点是成功地发展了利用原有的马克斯发生器技术对快速传输线部分进行脉冲充电,以产生具有短持续时间(10—100ns)的高功率脉冲。从那时以来,脉冲功率技术的进展非常迅速,世界上许多主要实验室正在进行各项发展工作。在美国进行这方面研究的,有离子物理公司,物理国际公司,麦克斯韦实验室,康奈尔大学,海军研究实验室和圣地亚国家实验室。现在,已经有了许多篇关于脉冲功率技术发展方面的极好的评论文章^[1, 2]。

表1.1列出了几个有代表性的强流束发生器。一般说来,这些(装置的)系统或者是用直流充电,或者是用脉冲充电。直流充电的装置(如FX-25和FX-100加速器)的方块图示于图1.1,它们是由用范德格喇夫柱对高压电极充电组成的。在此情况下,脉冲形成线就是高压电极本身。能量借助单输出开关耦合到高压二极管。电介质通常是如六氟化硫这类含负电性分子的高压气体。显然,这些系统十分简单,它们可以给出很稳定的重复脉冲,但一般没有脉冲充电系统的灵活多用性,输出能量也受到限制,这里就不进一步讨论了。

更一般的脉冲充电系统如图1.2所示。这种系统的成功设计可以防止出现不希望有的电弧,并控制高压击穿以得到可靠的开关性能。虽然基本的充电单元也有用脉冲变压器的,但低电感的马克斯发生器却要占绝对优势。在设计得好